

# 压缩机中间抽气结构优化设计

冀春俊<sup>1</sup>, 刘丰庆<sup>1</sup>, 余道刚<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学能源与动力学院, 辽宁 大连 116023;

2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:** 利用数值计算的方法研究了离心压缩机中间抽气部分结构的优化设计方法。中间抽气结构采用蜗壳的形式以保证抽气前后流动的周向均匀性, 对蜗壳的型式和抽气隔板的形式以及高度进行了大量的优化设计工作, 以满足抽气量的需要, 并保证整个流场中的流动损失尽量小。数值计算结果表明, 设计的抽气结构能够同时满足机组性能和抽气的需求。

**关 键 词:** 中间抽气; 数值模拟; 抽气蜗壳; 优化

中图分类号: TK474.8 文献标识码: A

## 引 言

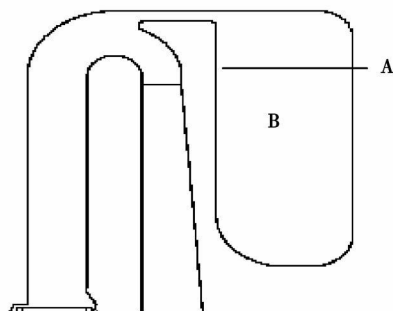
随着化工规模的日益增大以及化工工艺过程的复杂化, 压缩机工作过程中常常需要在压缩机的某级之间抽出一定压力的气体进行其它化工工艺利用, 在以往的设计中, 抽气的位置一般在弯道处将抽气引入一个大的空腔, 通过管道和阀门控制气流量; 这将在抽气前后引起较大的周向不均匀性, 气流参数在大范围变化, 其结果一方面影响这些级的工作效率, 另一方面, 如果流场的周向均匀性和径向均匀性破坏到一定程度时, 可能引发旋转失速等强非定常流动现象, 直接影响到机器的安全稳定性。目前, 国外对压缩机排气、抽气的各种结构形式都有一定深入地研究, 技术也比较成熟, 而在国内, 仅仅有几家高校对此进行教学形式上的研究, 没有形成生产技术。因此对压缩机中间抽气的型式开展研究, 开发性能良好的机器, 对于提升企业竞争力有着重要的意义。

本文研究了采用蜗壳抽气方式保证气流参数的径向均匀性, 着重对抽气部分和主气流之间的隔板的形状和高度进行设计, 对整个抽气蜗壳进行设计, 对整个抽气部分流场及受抽气部分影响的主气流流场进行数值模拟计算, 分析比较各个隔板高度下的流量特性, 分析整个计算流场的流动情况, 寻求最佳

性能的方案, 并据此优化蜗壳的几何结构、建立新的数值模型, 以达到提高计算的理想方案。利用专门针对旋转机械的商业计算软件 NUMECA 对压缩机中间抽气所在的完整模型级进行了详细的三维数值模拟计算。

## 1 物理模型及计算网格的建立

本文研究的模型结构为百万吨乙烯工程中的丙烯压缩机。分析抽气特点, 为了得到一个高效、稳定的流场, 在结构尺寸允许的情况下, 采用了蜗壳的形式进行抽气, 而且根据抽气结构所在位置将蜗壳形式确定为内包式(进气通道在蜗壳的外径处)。蜗壳的设计是根据传统方法, 按动量矩不变的规律, 设蜗壳的入口气流角为常数的情况下进行的, 因为该压缩机的工作背景比较符合本文的设计要求, 经过详细的前期计算也表明, 应用该设计方法得到的蜗壳, 在给定的工况条件下, 其内部流动十分顺畅, 压力分布也比较合理。为了能保证合理的气流量的分配以及减少中间抽气对主气流的影响, 设计一个合理的抽气隔板比较关键, 经过各种方案对比和详细的理论论证, 最终确定隔板结构如图 1 所示, 隔板前端圆角半径为 10 mm。



A—隔板 B—抽气蜗壳

图 1 抽气结构子午通道

收稿日期: 2007-09-30; 修订日期: 2008-07-30

作者简介: 冀春俊(1962—), 男, 河南镇平人, 大连理工大学副教授。

初步设计时, 为了避免蜗壳跟出风筒之间相互干涉而引起流动不均匀, 导致结构效率下降, 首先将蜗壳各个截面中心线轴向偏移, 直到蜗壳和出风筒不再相互干涉, 根据流体的速度方向做出横向蜗舌, 利用 PRO/E 造型软件进行造型, 结合 NUMECA 的子模块 igg 和 autogrid 进行网格划分, 得到初步的计算模型如图 2 所示。



图 2 完整的初次计算模型

整个模型的计算网格的节点总数为: 蜗壳加入口延伸段、叶轮、无叶扩压器加弯道、回流器、出口延伸段等于  $2\ 661\ 815 + 4\ 324\ 419 + 4\ 624\ 884 = 11\ 611\ 118$ 。所有近壁区域的网格都适当加密, 第一层网格尺度约为  $0.02\ \text{mm}$ , 3 个部分的交接面之间采用冻结转、静子交接面连接方式。由于用到并行计算, 所以不必担心网格数量带来的计算机负担的问题。

## 2 数值方法与边界条件

采用 FINE/TURBO 三维粘性流动的 CFD 计算软件。控制方程是守恒形式的时均  $N-S$  方程, 有限体积法离散。在湍流模型选取的时候, 鉴于宁方飞等人推导过 Splart-Allmaras 模型的守恒形式<sup>[1]</sup>, 并将其用于了二维扩压器和三维压气机转子湍流流场的计算, 取得了很好的效果, 模型相似, 因此本文也选择了该一方程模型进行计算。将工作介质换算成空气。本文的边界条件比较特殊, 有一个进口, 两个出口, 应分别设定边界条件, 但是根据设计要求, 两个出口有相同的压力值, 因此, 指定入口为流量  $45.07\ \text{kg/s}$  和速度方向, 入口温度  $293\ \text{K}$ , 湍流黏度  $1.57 \times 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}$ , 出口给定静压  $164\ 989\ \text{kPa}$ , 叶轮转速为  $3\ 965\ \text{r/min}$ , 而预定的抽气量约为总流量的 21%, 所以设计抽气结构计算得到的抽气量必须能够大于或者稍多于该预定量才能满足要求。

## 3 计算分析

追求高效是设计的出发点之一, 据分析, 蜗壳内的主要流动损失为摩擦损失、二次流损失和内泄露损失。所谓内泄露损失是由于蜗壳和出风筒构成一个环形的通道, 其中会有循环流动的产生而造成内泄露损失, 这是由结构决定的。由于制造工艺和方法的提高, 尽管仍然有壁面摩擦损失的存在, 但是表面粗糙度已经不是引起摩擦损失的主要原因。目前, 压缩机的效率主要是由各部件的结构特点来决定, 因此, 蜗壳和隔板的型线结构对流动有着举足轻重的影响。计算结果表明, 如图 3~图 7 所示, 隔板

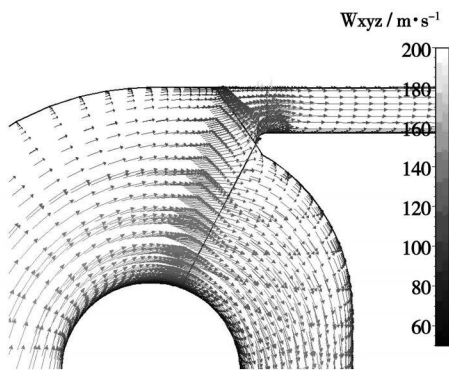


图 3 抽气结构附近流场分布

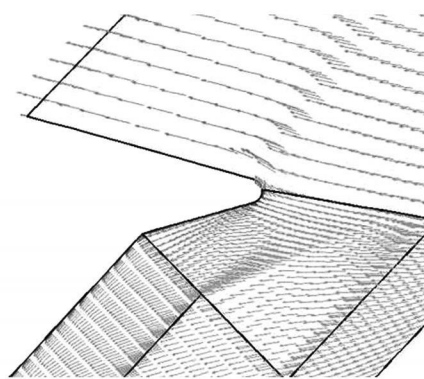


图 4 横向蜗舌附近流场

起到了很好的分流作用, 隔板两边流动都比较均匀; 而本文设计的横向蜗舌走向基本与来流的方向一致, 也能够较好地实现其导流作用; 抽气蜗壳中的流动也非常均匀, 没有大的漩涡出现, 保证了抽气结构有较高的效率。从计算数值上来看, 抽气结构中的流量是  $13.577\ \text{kg/s}$ , 约占总流量的 30%, 能够满足抽气量的设计需求。从隔板后的回流器流场可以看出, 整个流场在周向上比较均匀, 中间抽气并没有对

后面流场造成较大的影响; 叶轮及扩压器中的等压线的分布图也表明, 抽气结构对前面的流场有一定的影响, 但不是很大, 基本不会造成额外的效率损失, 整个计算模型级的多变效率是 78.1%。

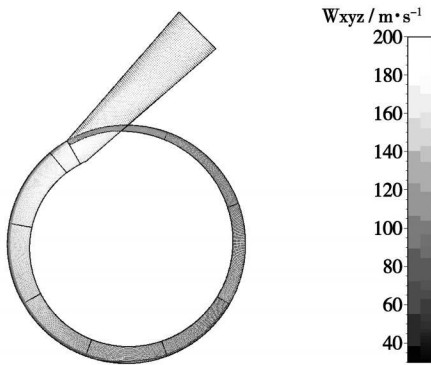


图 5 蜗壳内流场特点

状分布, 会引起加工定位的不准确, 给工厂的工艺加工造成一定困难, 因此为了便于工厂加工, 按照传统的方法重新设计抽气蜗壳, 任由蜗壳和出风筒干涉, 但是修改蜗壳的零度截面位置, 让两者的干涉面在蜗壳的最小截面附近, 尽量减少由于干涉对蜗壳内流动的影响, 出风筒改成直出风筒。经过几次修改结构并计算的过程中还发现, 隔板前端导圆半径的大小对抽气量有较大的影响, 因此数次修改模型结构进行验证, 发现在进气道宽度不变的情况下, 隔板前端导圆越小, 抽气量越小, 当其半径值减少到 2 mm 时, 抽气量恰好能满足要求, 因此, 本文正式确定第二次抽气结构如图 8 所示。第二次计算模型的网格节点总数为: 蜗壳加入口延伸段、叶轮、无叶扩压器加弯道、回流器、出口延伸段等于  $1\ 666\ 017 + 4\ 324\ 419 + 4\ 984\ 740 = 10\ 975\ 176$  个节点。

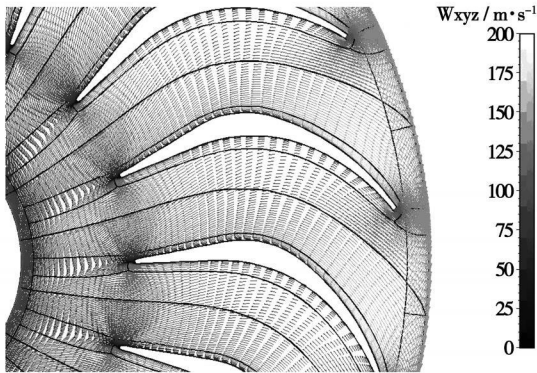


图 6 回流器流场分布



图 8 修改后计算模型

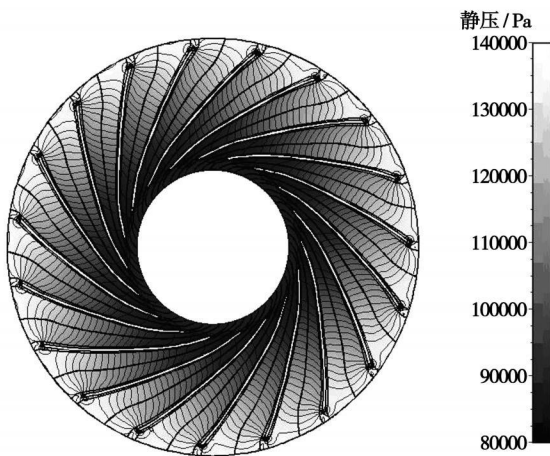


图 7 叶轮中静压等值线分布

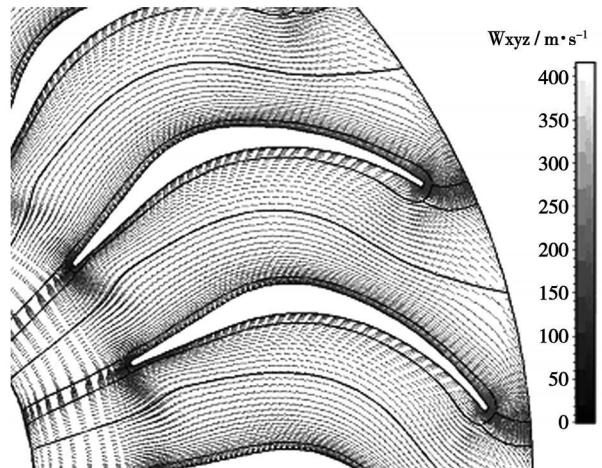


图 9 回流器流场分布

#### 4 设计方案修改及计算分析

在数值方法和边界条件都不变前提下得到数值

蜗壳截面轴向偏移之后其中心线变成螺旋线形

计算结果, 如图 9 所示, 观察回流器的流场可以发

现,在蜗壳和出风筒的干涉面附近(图中左偏上处),气流速度低于周向其它相同位置处的流体速度,说明蜗壳和出风筒的干涉对回流器的流场有着较大的影响,但在建模的时候已经考虑了这种影响,对蜗壳零度截面的位置作了修正,让干涉面在最小截面附近,已经极大地降低了这种结构所带来的影响,提高了蜗壳的内效率,降低了由于抽气对回流器流场产生的影响,但在蜗壳和出风筒的干涉面处有明显的低速区,流场比较紊乱,而且附近有比较大的漩涡产生;观察叶轮等压线分布也可以看出,与第一次设计的抽气结构相比,叶轮受到的影响要重一些,因此效率必然会有所下降;从计算数值上可以知道,计算模型的总体多变效率是 77.38%,与第一次计算相比仅仅下降了 0.7%左右,然而这种设计方案的加工工艺性能要大大优于最初设计方案,是比较易于实现的方案。

## 5 结 论

(1) 在建立计算模型时,条件允许的情况下应该采用全通道网格进行计算,而不是做单通道网格后设周期性边界,全通道模型才能真实地反映中间抽气对整个流场的影响。

(2) 在做外包式蜗壳的时候,由于不能按照常

规内包式蜗壳那样做出蜗舌结构,应该尽量采用截面中心线偏移的方法避免蜗壳和出风筒干涉,做一个横向的蜗舌结构,用以引导流动,改善流场,提高整体效率。

(3) 叶轮机械的中间抽气结构采用蜗壳的形式,可以有效地避免局部抽气引起的周向流动不均匀性及其引起的下游不稳定性流动和额外的效率损失,有效地提高机器的整体效率。

### 参考文献:

- [1] 宁方飞,徐力平. Spalart-Allmaras 湍流模型在内流流场数值模拟中的应用[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(3): 304-306.
- [2] AYDER E, HAGELSTEIN D. Improved model for the design and analysis of centrifugal compressor volutes[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 121(3): 619-625.
- [3] 黄钟岳,王晓放. 透平式压缩机[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 潘地林, WHITFIELD A. 蜗壳内部流动特性数值分析及改进设计研究[J]. 流体机械, 1999(1): 14-18, 13.
- [5] 戴 韧, 崔清章, 陈康民. 离心透平蜗壳内流动的试验与数值研究[J]. 发电设备, 2004(5): 272-275.
- [6] 郑小波, 罗 兴. 不完全蜗壳的 CFD 分析及优化设计[J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 9-12, 34.
- [7] 商 宇, 姚兰香. 300 MW 汽轮机中压排气蜗壳的试验研究[J]. 东方电气评论, 1999, 13(4): 255-259.

(编辑 董 斌)

新技术、新工艺

## 汽轮机调节系统技术改进

据《Электрические станции》2008 年 3 月号报道,目前,很多制造商正在对汽轮机调节系统进行现代化改造。

应用具有专用的电液伺服传动装置的调节阀,允许更精确地保证汽轮机调节系统静特性的线性。

应用具有在机械上与控制它的伺服传动装置的断路滑阀无关的电力机械变换器的电液伺服传动装置,允许建造具有最小蒸汽压力损失并具有最佳配置可能性的蒸汽分配装置。

应用具有使用所提议的逐段线性功能程序的反馈放大器(位置控制器),即使在伺服传动装置的位置传感器失灵时,也能保证汽轮机调节系统可靠并高质量的动作。这时,液压伺服传动装置可以对自身失灵的滑阀具有线性的反馈,这就简化了伺服传动装置本身的结构。

(吉桂明 供稿)

压缩机中间抽气结构优化设计= **Optimized design of an Intermediate Bleeding Structure for a Compressor**[ 刊, 汉] /JI Chun-jun, LIU Feng-qing (College of Energy Source and Power, Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116023), YU Dao-gang (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 591 ~ 594

Various methods for the optimization design of an intermediate bleeding structure for a centrifugal compressor were studied by utilizing numerical calculation techniques. A volute type was adopted for the intermediate bleeding structure to guarantee the circumferential uniformity of flow before and after the bleeding. A great deal of optimization design work has been done with respect to the volute and bleeding diaphragm type as well as its height to meet the need for a proper bleeding flow rate, and also to minimize the flow losses in the whole flow field. The numerical calculation results show that the bleeding structure thus designed can simultaneously meet the requirements for performance and bleeding of the compressor unit. **Key words:** intermediate bleeding, numerical simulation, bleeding volute, optimization

轴流压气机氦气和空气工质相似问题研究= **A Study of Similarity Problems Concerning the Working Media Helium and Air in an Axial-flow Compressor**[ 刊, 汉] /ZHU Rong-kai, ZHANG Jian, ZHENG Qun (College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), ZOU Ji-guo (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 595 ~ 600

With the axial speed of a helium axial compressor being less than or equals to 200 m/s, under the condition of identical geometric dimensions being guaranteed and with the first stage in the HP section serving as a simulator, the parameters of the stage can be given as follows: helium flow rate 4.72 kg/s, inlet pressure  $1.0253 \times 10^6$  Pa and inlet temperature 35.5 °C. When air instead of the helium was used to simulate the first stage of HP section in the helium compressor, research was performed on a variety of problems, such as the movement and kinetic incomplete similarity caused by the difference of the two working media helium and air in such physical parameters as density, viscosity and adiabatic index. In addition, a contrast analysis was also conducted of the establishment of similarity criteria by adopting respectively a definite physical quantity method and a differential equation approach, comparing the difference between the working media helium and air as well as its influence on the choice of similarity criteria. Pertinent reasons for the onset of deviations were analyzed and the similarity criteria for simulating a helium compressor with the use of air were identified as  $Sr$ ,  $Re$  and  $Eu$ . The air simulation parameters corresponding to the design operating condition of the helium compressor were calculated. A contrast analysis of CFD (computational fluid dynamics) calculation results show that the simulation effectiveness is satisfactory. The foregoing research can provide a theoretical basis for conducting helium compressor tests. **Key words:** similarity criterion, helium, axial-flow compressor, aerodynamic performance

带冠叶片碰撞减振机理研究= **A Study of Collisional Vibration-abatement Mechanism of Shrouded Blades**[ 刊, 汉] /LI Jian-zhao, ZHANG Wen-ping (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), LI Guo-bin (Naval Representative Office Resident at CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(6). — 601 ~ 605

Through a study of non-linear boundary conditions of shrouded blades, established was a completely new three-dimensional entity-unit finite element model for the blades featuring collision damping. Through a calculation analysis and a comparison of test results, the computation accuracy of the model in question has been verified, and the characteristics of two flat blades analyzed under the condition of different clearances, exciting force amplitudes and frequencies. The ensuing results show that with an increase of the shroud clearance, exciting force amplitude and frequency, the blades exhibit a conspicuous spectral component. The blades displaying collision conditions can suppress external forces to do work, making it possible to control the dynamic stress of the blades by adjusting the shroud parameters. **Key words:** shrouded blade, collision damping, vibration abatement, finite element